第46卷　第12期
2023年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 12
Dec. 2023

塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴对新月形沙丘表面粒度变化的影响

陈京平[1]，余子莹[1]，杨　帆[2,3]，王　蜜[1]，胡　涵[1]，
丁　璇[1]，高　鑫[4]，王　鑫[1]

（1. 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州　730000；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐　830002；3. 新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站，新疆 乌鲁木齐　830002；4. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐　830011）

摘　要： 以塔克拉玛干沙漠腹地的新月形沙丘为研究对象，对同一沙丘在沙尘暴作用下形态从新月形沙丘–不规则沙丘–新月形沙丘的演变过程做了观测记录，通过对不同形态沙丘表沙的粒度测量，研究沙尘暴对新月形沙丘表沙粒度的影响。结果表明：(1) 新月形沙丘变形前与复原后，迎风坡中轴线处表沙的粒度变化趋势未发生变化，表现为从迎风坡脚至丘顶整体上逐渐变粗，表明风向风力相同或相近时，沙尘暴对形态相近的新月形沙丘迎风坡的粒度分布模式影响较小。(2) 新月形沙丘中轴线与沙脊线处表沙均以极细沙和细沙为主，新月形沙丘原貌时，极细沙和细沙的平均占比在迎风坡与背风坡中轴线处分别为83.07%、82.81%，在左翼与右翼沙脊线处分别为84.42%、91.20%，复原为新月形沙丘后，极细沙和细沙的平均占比在迎风坡与背风坡中轴线处分别为73.18%、76.31%，在左翼与右翼沙脊线处分别为76.63%、74.0%。沙尘暴过后复原的新月形沙丘表沙分选性极好，粒径整体偏细，粒度参数一致性增强，表明沙尘暴对新月形沙丘表沙的粒度特征有重要影响。研究结果可为沙尘暴作用下新月形沙丘表沙粒度的空间分布规律研究提供重要参考价值。

关 键 词： 沙尘暴；新月形沙丘；粒度；塔克拉玛干沙漠

文章编号： 1000－6060(2023)12－1995－10(1995～2004)

塔克拉玛干沙漠腹地盛行风向下平坦沙地易于形成简单新月形沙丘，新月形沙丘通过形态变化响应风况变化。沙尘暴时塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘的形态变化明显，其形态变化与风况关系的研究对揭示新月形沙丘这种典型风积地貌的形成演变机制具有重要意义[1]。新月形沙丘形态演变的实质是风力作用下沙丘不同部位沙粒的侵蚀与沉积，该过程会记录在沙丘表沙中，而表沙粒度也能够指示环境的风动力特征[2–3]。因此，新月形沙丘的表沙粒度是研究新月形沙丘形态演变过程的重要指标之一[1,4–6]。前人通过沙丘表沙粒度特征的研究，认为新月形沙丘迎风坡沙粒粒径一般比背风坡更粗，背风坡沙粒相较迎风坡分选性更好[7–11]，而相关研究对新月形沙丘表沙粒度从迎风坡脚至迎风坡顶的变化却存在不同认识[1–2,12–13]。目前的研究以迎风坡脚沙粒粒径最粗和迎风坡顶沙粒粒径最粗这2种模式为主[2]，如对塔克拉玛干沙漠腹地复合型沙垄垄间地新月形沙丘表沙粒度的研究表明，迎风坡沙粒粒径逐渐变细，分选性逐渐变好[9,14]，而在沙坡头湖盆滩地上沙丘顶部的沙粒粒径最粗[10]。

收稿日期： 2023-07-19；　**修订日期：** 2023-09-11
基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0302)；国家自然科学基金委面上项目(42072211)资助
作者简介： 陈京平(1998-)，男，硕士研究生，主要从事全球变化与应对方面的研究. E-mail: chenjp21@lzu.edu.cn
通讯作者： 王鑫(1983-)，男，博士，教授，主要从事地貌演化与新生代环境研究. E-mail: xinw@lzu.edu.cn

此外，还有研究认为迎风坡表沙粒径的变化特征具有差异性，如在库姆塔格沙漠的研究表明沙粒在迎风坡脚和迎风坡顶较粗，在沙丘中部位置较细[11,15]。由此可见，迎风坡沙粒粒度的分布模式较为复杂多样，因此提供更多环境状况下的参考模式将有助于对迎风坡沙粒粒度分布规律进行阐释。

以往新月形沙丘迎风坡不同部位沙粒粒径的分布特征研究多在自然状态、大风前后以及不同风向条件下进行[4-6,14]，缺少沙尘暴环境这种极端气象条件下新月形沙丘形态演变时表沙粒度变化的观测研究。此外，前人研究所处的环境状况以及研究对象的形态参数差异较大，也会引起迎风坡表沙粒径分布模式的认识差异，因而选择同一沙丘进行连续观测记录，将有助于探究沙丘迎风坡的粒度分布模式。塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘沙侵蚀量与堆积量相对平衡，沙丘形态较为稳定，适合作为沙丘表沙粒度变化影响因素研究的对象[16]。因此，本文在塔克拉玛干沙漠腹地对一简单新月形沙丘在沙尘暴作用下的形态变化开展了观测，在沙尘暴过后记录其形态参数。新月形沙丘的形态在沙尘暴作用下从新月形沙丘变为不规则沙丘，又从不规则沙丘复原为新月形沙丘，并在形态发生变化后采集了表沙样品。通过对新月形沙丘形态演变后表沙粒度的测量，了解其优势粒度特征，以期为新月形沙丘表沙粒度的空间分布规律研究提供数据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区(83°42.06′E，38°58.44′N)，是塔克拉玛干沙漠最具代表性的研究区域之一[17-18]。该地区年平均气温13.6 ℃，年降水量25.9 mm，年潜在蒸发量可达3798.5 mm[19]。塔中地区地貌景观主要由大量的高大纵向复合型沙垄和垄间地构成，一般沙垄高40~50 m，垄间地宽1~2 km，沙垄多为NE—WS走向[20-22]。垄间地较为平坦，粗沙与细沙相间分布，垄间地背风坡一侧分布有一些低矮的线性沙丘链、不规则沙丘及新月形沙丘等[16]。该区域原生植物稀少，植被主要分布于地下水较浅的区域。在沙漠公路及石油工人生活区植被覆盖度较高，沙漠腹地其余地面基本为裸露沙面，风沙活动强烈。塔中地区盛行风向为东北风，风沙活动多集中于4—8月，年起沙数可达500次以上[20]，其中沙尘暴多集中于春夏季节，沙尘暴全年日数可达68~88 d[19-21]。

1.2 样品采集与分析

新月形沙丘的形态特征与风况密切相关，本文观测了沙尘暴作用下新月形沙丘的形态变化，并采集了沙丘表沙样品。原始新月形沙丘(图1a)前14 d的风况以东北风为主(图1b)，沙尘暴过后于2021年6月25日采集表沙样品，先沿中轴线从迎风坡脚至背风坡脚方向采样，后沿沙脊线从左翼至右翼方向采样(图1c)。2021年7月8日以西北风为主的沙尘暴过后(图1e)，新月形沙丘转变为不规则沙丘(图1d)，表沙样品先沿槽线采集，后沿沙丘脊线采集(图1f)。2021年7月12日以东北风为主的沙尘暴过后(图1h)，不规则沙丘又复原为新月形沙丘(图1g)，此时表沙样品采样与沙丘原貌时相近(图1i)。

沙丘表沙样品使用钢铲平行于沙丘表面采集，采样深度2 cm，表沙样品除新月形沙丘原貌时迎风坡、左翼及右翼按1 m间距采样外，其余样点均按0.5 m间距采样。样品按采样顺序以字母加数字编号，其中丘顶样品归于迎风坡一侧，在沙脊线处对其做第二次编号，并在丘顶样品后加竖直虚线以区分两侧(表1)。表沙样品在兰州大学西部环境教育部重点实验室做粒度实验前处理，而后使用Mastersizer 2000激光粒度仪测量样品粒度。常用的粒度参数有平均粒径、众数粒径、分选系数、偏度及峰度等，样品的粒度参数采用Folk-Ward公式计算[23-25]。样品粒级划分采用Udden-Wentworth标准[26]，其中5.5~63 μm为粉沙，63~125 μm为极细沙，125~250 μm为细沙，250~500 μm为中沙。本文中风速风向数据由塔中气象站提供，数据由芬兰VAISALA公司产的WAA151型传感器测量，风速量程范围为0.4~75 $m \cdot s^{-1}$，其测量精度(风速介于0.4~60 $m \cdot s^{-1}$)为±0.17 $m \cdot s^{-1}$，风向测量范围是0°~360°，其测量精度为±3°。

2 结果与分析

2.1 沙尘暴对新月形沙丘形态演变的影响

塔克拉玛干沙漠腹地的沙尘暴风力强劲，持续时间长，能够较为持续地搬运沙粒。影响新月形沙

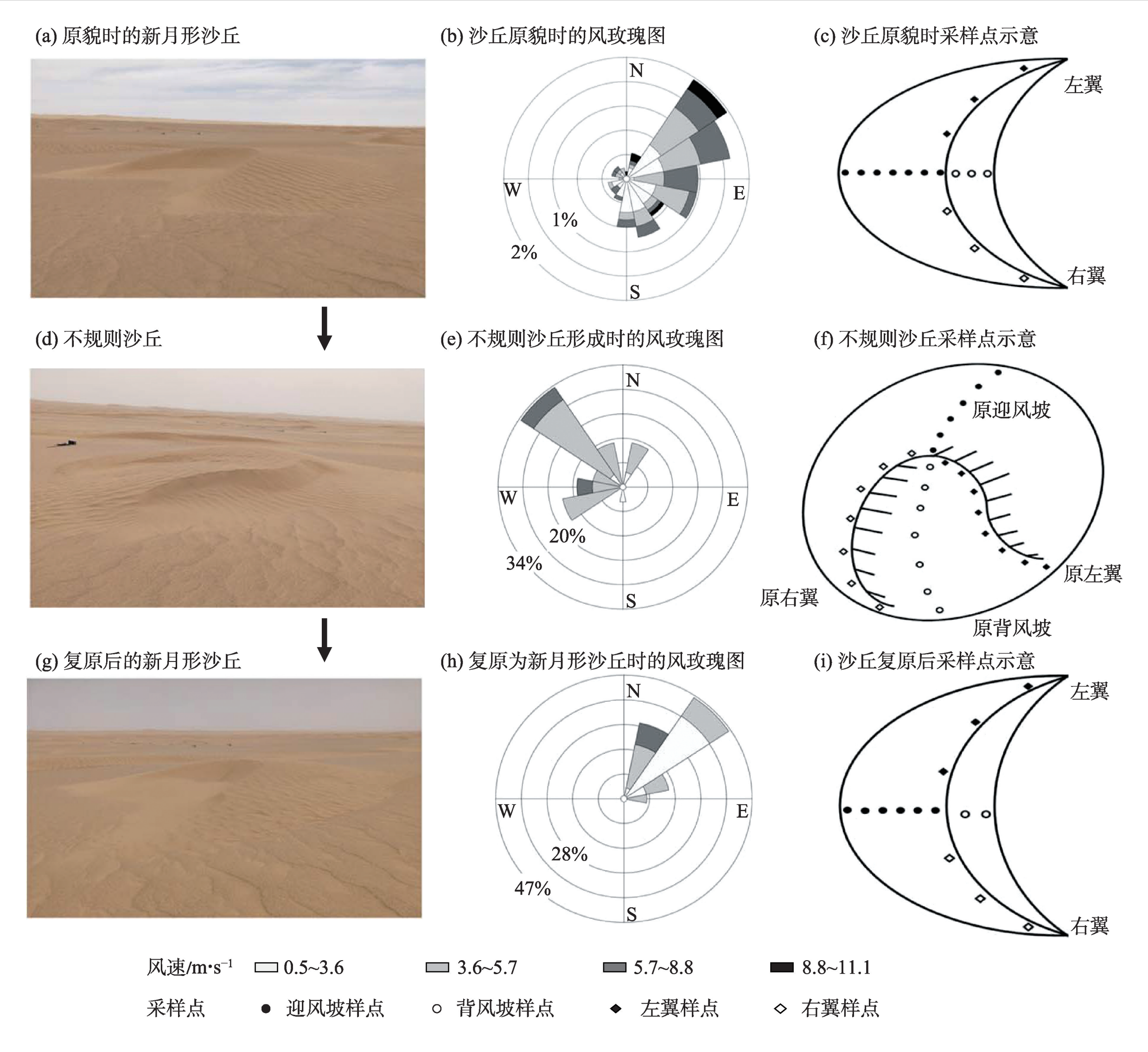


图1　新月形沙丘的形态演变及采样点位置示意

Fig. 1　Morphological evolution of barchan dune and location of sampling points

丘形态变化的沙尘暴，2021年6月23日当天最高风速基本出现在夜间(图2)。2021年7月8日沙尘暴的风向异于盛行风向(图1e)，现场记录沙尘暴历时8 h，起沙风速平均为7.2 m·s^{-1}，此次沙尘暴过后新月形沙丘变形为不规则沙丘(图1d)，相较原始新月形沙丘，不规则沙丘的高度有所降低，原迎风坡及背风坡一侧长度有所减小，原两翼一侧长度均有所增加(表2)。2021年7月12日沙尘暴的风向再次与盛行风向相同(图1h)，现场记录沙尘暴历时8.5 h，起沙风速平均为8.0 m·s^{-1}，此次沙尘暴过后不规则沙丘又复原为新月形沙丘(图1c)，复原后沙丘高度与原貌时相近，迎风坡长度减少1.2 m，背风坡长度减少1.5 m，两翼长度均有所增加(表2)。沙尘暴前后对新月形沙丘形态的实地观测发现，不同风速风向的沙尘暴对沙丘的形态演变具有重要影响。

2.2　沙尘暴对新月形沙丘表沙粒度的影响

2.2.1　*众数粒径*　新月形沙丘原貌时，表沙众数粒径从迎风坡脚105 μm逐渐增大至丘顶176 μm，从丘顶整体减小至背风坡脚87 μm(图3a)。表沙的众数粒径在左翼翼角处为116 μm，在右翼翼角处为121 μm，新月形沙丘两翼沙脊线处众数粒径基本呈对称分布(图3d)。新月形沙丘被破坏为不规则沙丘后，沙脊线处表沙的众数粒径在原沙丘迎风坡一侧从125 μm整体增大至丘顶处161 μm，在原沙丘背风坡一侧槽线处，表沙众数粒径整体上先减小至117 μm，后增大至125 μm(图3b)。在原沙丘左翼一侧沙脊线处，表沙众数粒径整体呈减小趋势，在原沙丘右翼一侧沙脊线处，表沙众数粒径整体呈先

表1 新月形沙丘采样信息

Tab. 1 Sampling information of barchan dunes sampling information

沙丘形态		新月形沙丘原貌	不规则沙丘	新月形沙丘复原
采样日期		2021年6月25日	2021年7月8日	2021年7月12日
采样日期平均风速/m·s⁻¹		3.3	6.3	6.8
迎风坡	采样间距/m	1	0.5	0.5
	样品数	8	10	15
	样品编号	A1~A8	B1~B10	C1~C15
背风坡	采样间距/m	0.5	0.5	0.5
	样品数	8	7	5
	样品编号	A9~A16	B11~B17	C16~C20
左翼	采样间距/m	1	0.5	0.5
	样品数	3	14	8
	样品编号	A17~A20	B18~B32	C21~C29
右翼	采样间距/m	1	0.5	0.5
	样品数	3	11	10
	样品编号	A21~A23	B33~B43	C30~C39

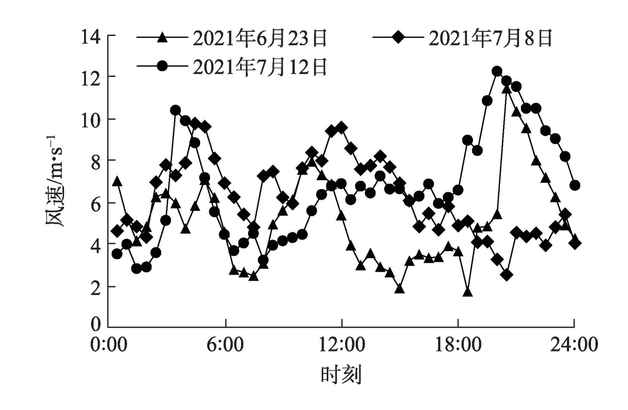


图2 沙尘暴期间30 min平均风速

Fig. 2 Average wind speed in 30 min during sandstorm

表2 新月形沙丘形态参数

Tab. 2 Morphological parameters of barchan dunes

沙丘形态	新月形沙丘原貌	不规则沙丘	新月形沙丘复原
沙丘高度/m	1.1	0.8	1.2
迎风坡长度/m	8.3	4.6	7.1
背风坡长度/m	4.1	3.7	2.6
左翼长度/m	3.8	7.2	4.1
右翼长度/m	3.6	6.0	5.2

增大后减小、后又增大的变化趋势(图3e)。

不规则沙丘复原为新月形沙丘后,表沙的众数粒径从迎风坡脚103 μm整体增大至丘顶174 μm,从丘顶至滑落面处整体上减小至108 μm,从滑落面处到背风坡脚增大至136 μm(图3c)。从左翼翼角处107 μm与右翼翼角处119 μm,沿沙脊线整体增大至丘顶174 μm(图3f)。从不规则沙丘复原为新月形沙丘后,表沙众数粒径的变化特征整体上与新月形沙丘原貌时相近,但两翼沙脊线处众数粒径的对称性比原貌时较差。从图3a和图3c可以看到,受崩塌效应影响,丘顶至背风坡脚表沙的众数粒径在滑落面界线附近虽变化幅度较小,但存在一个较为明显的转折。

2.2.2 平均粒径与分选性 新月形沙丘原貌时,沙丘中轴线上表沙平均粒径从迎风坡脚至丘顶整体上逐渐增大,从丘顶至背风坡脚整体上逐渐减小(图4a)。沙丘沙脊线上表沙平均粒径从左翼角至丘顶整体呈增大趋势,从丘顶至右翼角整体呈减小趋势(图4c)。复原为新月形沙丘后,沙丘中轴线上表沙平均粒径从迎风坡脚至丘顶整体上逐渐增大,增大过程中粒径大小的变化幅度较大,从丘顶至背风坡脚表沙的平均粒径呈先减小后增大的变化特点(图4b)。两翼脊线上表沙平均粒径变化趋势与原貌时相似,粒径大小的变化幅度较大(图4d)。综合来看,新月形沙丘原貌时与复原后,沙丘中轴线与沙脊线处表沙的分选性都极好。

2.2.3 偏度与峰度 新月形沙丘原貌时,沙丘中轴线上迎风坡表沙偏度为近对称与负偏,以近对称为主,沙粒的偏度变化较小;背风坡表沙偏度变化范围较大,有正偏、近对称及负偏,以近对称为主,正偏最少(图4a)。从左翼至右翼,沙粒的偏度只有近对称和正偏(图4c)。复原为新月形沙丘后,沙丘中

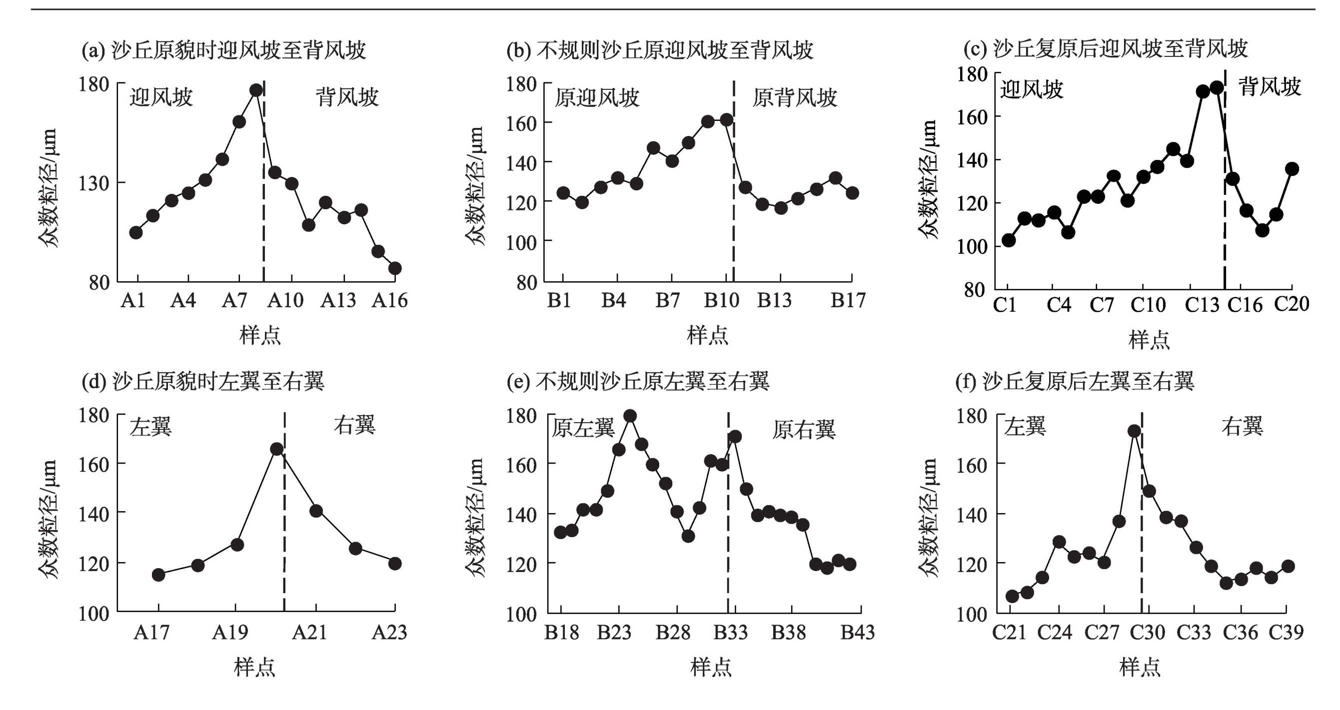


图3　新月形沙丘形态演变过程中表沙众数粒径变化

Fig. 3　Particle size variations of surface sediment during the morphological evolution of barchan dunes

图4　新月形沙丘原貌时与复原后表沙的粒度参数

Fig. 4　Particle size parameters of surface sediment of barchan dunes before and after restoration

轴线上沙粒的偏度全为极负偏，从左翼至右翼类似（图4b、d）。新月形沙丘原貌时，沙丘中轴线上迎风坡表沙峰度为很尖锐与正态，背风坡表沙峰度为正态、尖锐和很尖锐，其中尖锐最少，主要以正态为主（图4a）。除左翼一侧存在一个样点很尖锐外，从左翼至右翼其余样点均为正态（图4c）。新月形沙丘复原后，沙丘中轴线上沙粒峰度均为很尖锐，沙丘左翼至右翼类似（图4b、d）。沙尘暴过后复原的新月形沙丘偏度全为极负偏，峰度全为很尖锐，表沙粒度参数中偏度与峰度的分级更为单一。

2.2.4 粒级特征 迎风坡处，新月形沙丘原貌时细沙和极细沙含量占比之和介于76.02%~88.56%之间，平均为83.07%（图5a）。从迎风坡脚至丘顶，粉沙和极细沙含量占比整体呈下降趋势，细沙和中沙含量占比总体呈上升趋势。新月形沙丘变为不规则沙丘后，原迎风坡一侧细沙和极细沙含量占比之和介于81.32%~91.22%之间，平均为86.21%（图5c）。新月形沙丘复原后，迎风坡细沙和极细沙含量占比之和介于65.28%~81.27%之间，平均为73.18%（图5e）。从不规则沙丘复原为新月形沙丘后，其迎风坡沉积物的粒级变化特征与原貌时相似。新月形沙丘形态演变过程中，迎风坡表沙的粒级含量占比未发生根本性变化，新月形沙丘迎风坡表沙仍以细沙和极细沙为主，粉沙次之，中沙最少。

背风坡处，新月形沙丘原貌时细沙和极细沙含量占比之和介于64.12%~91.50%之间，平均为82.81%（图5a）。从丘顶至背风坡脚粉沙与极细沙含量基本上呈先增加后减少的变化趋势，而细沙和中沙含量基本上呈先减少后增加的变化趋势。新月形沙丘变为不规则沙丘后，原背风坡一侧细沙和极细沙含量占比之和介于91.26%~93.76%之间，平均为92.40%（图5c）。不规则沙丘复原为新月形沙丘后，背风坡细沙和极细沙含量占比之和介于73.35%~78.47%之间，平均为76.31%（图5e）。不规则沙丘复原为新月形沙丘后，背风坡表沙的粒级变化特征与原貌时相似。

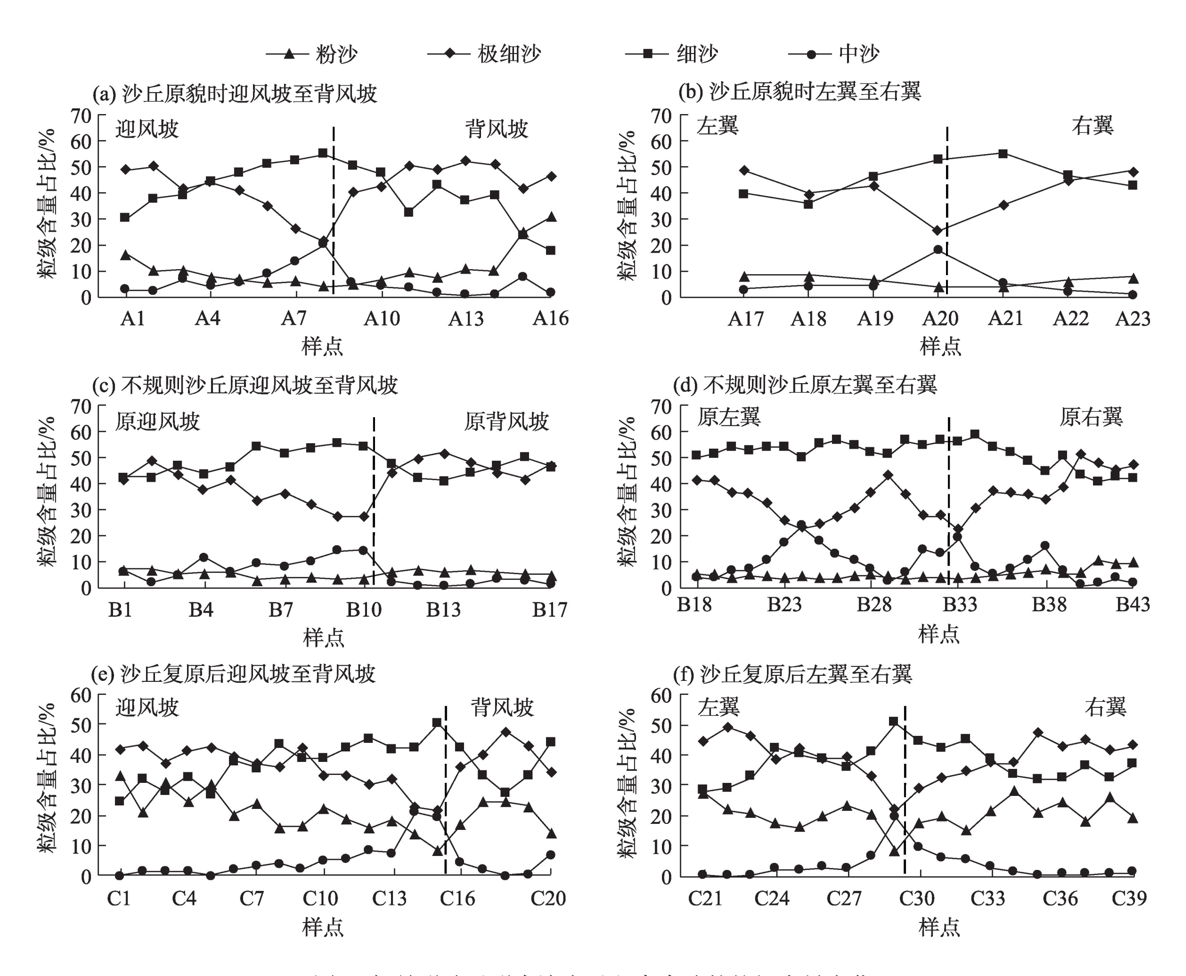


图5 新月形沙丘形态演变过程中表沙的粒级含量变化

Fig. 5 Particle content variations of surface sediment during the evolution of barchan dunes

两翼沙脊线处，新月形沙丘原貌时左翼沙脊线处细沙和极细沙含量占比之和介于75.52%~89.10%之间，平均为84.42%，右翼沙脊线处细沙和极细沙含量占比之和介于90.66%~91.51%之间，平均为91.20%（图5b）。在左翼沙脊线处粉沙和极细沙含量整体呈下降趋势，在右翼沙脊线处整体呈上升趋势，而细沙和中沙的变化趋势则相反。新月形沙丘变为不规则沙丘后，原左翼一侧细沙和极细沙含量占比之和介于72.56%~91.98%之间，平均为86.34%，原右翼一侧细沙和极细沙含量之和介于77.93%~93.97%之间，平均为86.56%（图5d）。在原左翼一侧极细沙含量整体上先下降后上升，细沙含量整体上呈小幅上升趋势。在原右翼一侧极细沙含量整体呈上升趋势，细沙含量整体呈小幅下降趋势。中沙含量在两翼上变化较大，在原右翼一侧中沙含量先下降后上升，后又下降，变化趋势与原左翼一侧相反。从不规则沙丘复原为新月形沙丘后，左翼沙脊线处细沙和极细沙含量占比之和介于72.31%~82.06%之间，平均为76.63%，右翼沙脊线处细沙和极细沙含量占比之和介于49.47%~81.24%之间，平均为74.0%（图5f）。在左翼极细沙含量整体呈下降趋势，细沙含量整体呈上升趋势，在右翼极细沙和细沙含量变化趋势与左翼相反。新月形沙丘两翼的表沙粒级特征与沙丘中轴线处表沙的粒级特征相似，均以极细沙和细沙为主。

3 讨 论

不同沙漠地区新月形沙丘迎风坡表沙粒度具有多种分布模式，出现最多的是迎风坡脚最粗模式与丘顶最粗模式[2]。本研究中新月形沙丘原貌时，以及从不规则沙丘复原为新月形沙丘后，新月形沙丘迎风坡表沙粒径从迎风坡脚至丘顶整体上均由细变粗，沙尘暴前后迎风坡表沙粒度的分布模式未发生变化，迎风坡粒度分布模式属于丘顶最粗模式。因沙尘暴前后新月形沙丘形貌相近，这种粒度分布特征可能与迎风坡的形态特征有关[13]。其迎风坡坡度变化较小，坡面无凸起，沙尘暴时粗颗粒沙粒可跃移或滚动至沙丘顶部位置[13]。在新月形沙丘发育演变过程中，迎风坡表面侵蚀或者沉积时会出现凸形迎风坡或凹形迎风坡[13,27]，若迎风坡下部被侵蚀出现凹形，迎风坡上部受沉积作用出现凸形，则迎风坡形态改变为凸形迎风坡后在气流与沙丘形态的相互作用下，迎风坡表沙能够更容易改变原有的粒度分布模式[13,27]。此外，迎风坡的表沙粒度分布还会受外部动力过程的影响[28-29]，沙尘暴增强过程中沙丘表面的细粒物质首先更易被带离地表，粗粒物质被搬运的概率也相应增加[13,30-31]，沙尘暴时携带粗粒物质的风沙流在经过沙丘顶部时载荷减小，也有利于粗沙粒在迎风坡顶部沉积[14,32]。因此，新月形沙丘迎风坡表沙的粒度分布特征受多因素综合影响。

沙尘暴对表沙的粒度特征有重要影响[33]。塔中地区沙尘暴前后表沙平均粒径的对比研究发现，沙尘暴过后表沙样品中细沙含量占比平均下降了55%，中沙含量占比平均下降了97%，而粉沙含量占比平均增加了243%[33]。塔中地区表沙以细沙和极细沙为主，沙尘暴过后表沙平均粒径减小了46 μm，沙尘暴过程中6 m高度内收集到的降尘样品以粉沙和极细沙为主，二者含量占比平均为80.89%[33]。新月形沙丘表面沙粒被侵蚀的同时，沙尘暴也会携带沙粒物质进行补充。沙尘暴时大量细粒物质进入空中，在沙尘暴减弱过程中粗粒物质一般先于细粒物质沉积[7,14,34]，因此沙尘暴过后细粒组分在表层的含量占比较高，使得表层粉沙的含量占比有所提高。沙尘暴携带的大量细粒物质使得复原后的新月形沙丘表沙粒径整体偏细，沙丘表沙的偏度全为极负偏，峰度全为很尖锐，偏度与峰度的变化范围变窄，偏度与峰度的分级更为单一，沙粒粒度参数的一致性增强。

4 结 论

（1）塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘原貌时，沙丘迎风坡中轴线处表沙粒径从迎风坡脚至丘顶逐渐变粗，从丘顶至背风坡表沙粒径逐渐变细。从不规则沙丘复原为新月形沙丘后，沙丘迎风坡中轴线处的表沙粒径整体变化趋势与新月形沙丘原貌时相似，表明风向风力相同或相近时，沙尘暴对形态相近的新月形沙丘迎风坡的粒度分布模式影响较小。

（2）塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘中轴线及沙脊线处的表沙主要以细沙和极细沙为主，新月形沙丘原貌时，迎风坡与背风坡中轴线处细沙和极细

沙的平均含量占比分别为83.07%、82.81%，左翼与右翼沙脊线处细沙和极细沙的平均含量占比分别为84.42%、91.20%。复原后为新月形沙丘后，迎风坡与背风坡中轴线处细沙和极细沙的平均含量占比分别为73.18%、76.31%，左翼与右翼沙脊线处细沙和极细沙的平均含量占比分别为76.63%、74.0%。沙尘暴过后复原的新月形沙丘表沙中粉沙含量有所增加，粒径整体偏细，分选性极好，偏度更负偏，峰度更尖锐，粒度参数一致性增强，表明沙尘暴对表沙的粒度参数有重要影响。

参考文献（References）

[1] 马倩, 武胜利, 刘永泉, 等. 艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 650−657. [Ma Qian, Wu Shengli, Liu Yongquan, et al. Grain size distribution of the parabolic dunes sediments in the Ebinur Lake Basin, Xinjing, China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 650−657.]

[2] 李静芸, 傅天阳, 申玉龙, 等. 毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 226−232. [Li Jingyun, Fu Tianyang, Shen Yulong, et al. Grain-size characteristics of surface sediments of barchan and parabolic dunes in the Mu Us Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2): 226−232.]

[3] 宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 597−603. [Song Jie, Chun Xi, Bai Xuemei, et al. Review of grain size analysis in China desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 597−603.]

[4] 贺佳嘉, 全占军, 潘美慧, 等. 塔克拉玛干沙漠高大沙垄区垄间地沿主风向连续分布新月形沙丘表面沙粒粒度特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 292−297. [He Jiajia, Quan Zhanjun, Pan Meihui, et al. Characteristics of grain size over four barchan dunes distributed downward engineering system of prevention and control of desertification of Taklimakan Desert highway along wind direction in interdune corridor of ridges[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2012, 48(3): 292−297.]

[5] 蒋宁, 李安琪, 赵晓萌, 等. 新月形沙丘表面粒度特征对沙丘发育规模及风向变化的响应——以塔克拉玛干沙漠东南缘新月形沙丘为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(4): 545−554. [Jiang Ning, Li Anqi, Zhao Xiaomeng, et al. Developmental scale and wind direction influence particle size characteristics of surface sediments over barchan dunes at southeastern edge of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2021, 57(4): 545−554.]

[6] 俞祥祥, 李生宇, 马学喜, 等. 不同发育阶段新月形沙丘表面粒度特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6): 111−118. [Yu Xiangxiang, Li Shengyu, Ma Xuexi, et al. The surface grain size characteristics of transverse dune at different development stages[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(6): 111−118.]

[7] Folk R L. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson Desert, northern Territory, Australia: Geomorphology and grain size relationships[J]. Sedimentology, 1971, 16: 5−54.

[8] Barndorff-Nielsen O, Dalsgaard K, Halgreen C, et al. Variation in particle size distribution over a small dune[J]. Sedimentology, 1982, 29: 53−65.

[9] 陈渭南, 雷加强. 塔克拉玛干沙漠新月形沙丘不同部位的粒度特征[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(2): 101−109, 112. [Chen Weinan, Lei Jiaqing. Grain size features of sands in different localities of barchan dunes, Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1992, 6(2): 101−109, 112.]

[10] 哈斯, 王贵勇. 沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 57− 61. [Ha Si, Wang Guiyong. Characteristics of grain size over crescentic dunes in Shapotou, southeastern Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 57−61.]

[11] 魏怀东, 王继和, 徐先英, 等. 库姆塔格沙漠各沙丘类型沙粒粒度分析[J]. 甘肃科技, 2007(5): 85−88. [Wei Huaidong, Wang Jihe, Xu Xianying, et al. Analysis of sand grains in the Kumtag Desetrt[J]. Gansu Science and Technology, 2007(5): 85−88.]

[12] 李志忠. 新月形沙丘研究进展综述[J]. 干旱区地理, 1994，17(4): 81−87. [Li Zhizhong. A comprehensive review on progress in study of barchan dunes[J]. Arid Land Geography, 1994，17(4): 81−87.]

[13] 姜吴彬, 张德国, 杨小平. 沙丘形态及表沙粒度特征对风况和地表植被变化的响应[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 120−129. [Jiang Wubin, Zhang Deguo, Yang Xiaoping. Response of dune morphology and grain size characteristics to the change of wind regimes and vegetation cover[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 120−129.]

[14] 刘宇胜, 魏翔鸿, 贾光普, 等. 一次大风过程对戈壁区新月形沙丘形态演变的影响[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(2): 14−20. [Liu Yusheng, Wei Xianghong, Jia Guangpu, et al. Influences on morphological change of barchan dunes during a strong wind process in gobi area[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2018, 44(2): 14−20.]

[15] 俞胜清, 阿布都·米基提, 周向玲, 等. 新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1629−1635. [Yu Shengqing, Mijiti Abdu, Zhou Xiangling, et al. Grain size characteristics of different parts of the crescent dunes in Karakum Desert, Xinjing, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33 (6): 1629−1635.]

[16] 李恒鹏, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠腹地复合沙垄间地新月形沙丘的逆向演变[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 39−43. [Li Hengpeng, Chen Guangting. Retrograde evolution of barchan on interdune corridor of complex ridges in central Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(2): 39−43.]

[17] Yang F, Huang J P, Zhou C L, et al. Taklimakan Desert carbon-sink decreases under climate change[J]. Science Bulletin, 2020, 65

(6): 431-433.

[18] Yang F, He Q, Huang J P, et al. Desert environment and climate observation network over the Taklimakan Desert[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(6): 1172-1191.

[19] 杨阳, 杨帆, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠塔中与巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射特征对比[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1068-1077. [Yang Yang, Yang Fan, Maimaitiyiming Maimaitiaili, et al. Comparative analyses on surface radiation characteristic in Tazhong of the Taklimakan Desert and Guaizihu Lake of the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1068-1077.]

[20] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提依明. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季风蚀起沙研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 770-776. [Yang Xinghua, He Qing, Maimaitiyiming Aili. Dust emission by wind erosion in spring and summer at Tazhong of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 770-776.]

[21] 赵聪敏. 塔克拉玛干沙漠沙粒形貌特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2012. [Zhao Congmin. Research on morphology characteristic of sand particles in Taklimakan Desert[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2012.]

[22] 范冬冬, 李生宇, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区沙丘分形特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 941-947. [Fan Dongdong, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Fractal features of dunes over the high longitudiral complex ridges in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 941-947.]

[23] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 54-60. [Lu Lianzhan, Shi Zhengtao. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 54-60.]

[24] 张正偲, 董治宝. 腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1789-1794. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Characteristic of dust deposition and particle size in spring in the southeastern Tengger Desert[J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1789-1794.]

[25] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.

[26] Krumbein W C. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1938, 8(3): 84-90.

[27] Wiggs G F S, Livingstone I, Warren A. The role of streamline curvature in sand dune dynamics: Evidence from field and wind tunnel measurements[J]. Geomorphology, 1996, 17: 29-46.

[28] 常兆丰, 朱淑娟, 段晓峰, 等. 新月形沙丘粒度分布的交替过程—以甘肃省河西沙区绿洲边缘积沙带为例[J]. 农业工程, 2019, 9(4): 76-82. [Chang Zhaofeng, Zhu Shujuan, Duan Xiaofeng, et al. Alternating processes of distribution of grain size over barchan dunes: A case study of accumulated sand belts of oasis edge of Hexi Desert area of Gansu Province[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(4): 76-82.]

[29] 常兆丰, 马中华, 朱淑娟, 等. 新月形沙丘顶点与沙脊线重合和分离的两种过程—以甘肃河西走廊沙区为例[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 167-173. [Chang Zhaofeng, Ma Zhonghua, Zhu Shujuan, et al. Processes of superposition and separation of barchan dunes on the top and ridge line: A case study in the desert areas of the Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 167-173.]

[30] 杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 等. 新月形沙丘研究进展[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 76-83. [Yang Yanyan, Liu Lianyou, Qu Zhiqiang, et al. A review of barchan dunes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1): 76-83.]

[31] Yang B, Wang Y, Zhang Y. The 3-D spread of saltation sand over a flat bed surface in aeolian sand transport[J]. Advanced Powder Technology, 2009, 20(4): 303-309.

[32] Claudin P, Andreotti B. A scaling law for aeolian dunes on Mars, Venus, Earth, and for subaqueous ripples[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 252(1-2): 30-44.

[33] 陈京平, 余子莹, 杨帆, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴和地表沙物质粒度特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 150-158. [Chen Jingping, Yu Ziying, Yang Fan, et al. Particle size characteristics of sandstorm and surface sand at Tazhong area of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2): 150-158.]

[34] 李振山, 陈广庭, 冯起, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地纵向沙垅表面沙物质粒度特征[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(1): 22-29. [Li Zhenshan, Chen Guangting, Feng Qi, et al. Grain size parameters along the transection of a complex longitudinal dune in the center of Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(1): 22-29.]

Effect of sandstorms on surface particle size variation of barchan dunes in the hinterland of Taklimakan Desert

CHEN Jingping[1], YU Ziying[1], YANG Fan[2,3], WANG Mi[1],
HU Han[1], DING Xuan[1], GAO Xin[4], WANG Xin[1]
(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration (CMA), Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: This study focuses on the barchan dunes situated in the hinterland of the Taklamakan Desert in Xinjiang, China. Our observations tracked the morphological evolution of a specific dune as it transforms from a barchan dune to an irregular dune and back to a barchan dune under the influence of sandstorms. By examining the particle size of surface sand across different dune morphologies, we investigate the impact of sandstorms on the particle size distribution in barchan dunes. Our findings reveal the following: (1) The particle size of surface sand along the central axis of the windward slope remains constant before and after the deformation and recovery of the barchan dune. However, there is a gradual increase in coarseness from the dune’s base to its summit. This suggests that, under similar wind direction and force conditions, sandstorms exert minimal influence on the particle size distribution pattern on the windward slope of barchan dunes with comparable morphology. (2) Both the central axis and sand ridges of the barchan dune predominantly feature extremely fine and fine sand. The average content of extremely fine sand and fine sand is 83.07% and 82.81% on the central axis of the windward slope and the leeward slope, and 84.42% and 91.20% on the left and right sand ridges, respectively. Moreover, after the sandstorm, the surface sand of the recovered barchan dune exhibits well-sorted and consistent characteristics, with an overall finer particle size, indicating a significant influence of the sandstorm on the particle size characteristics of the surface sand. These results offer valuable insights into the spatial distribution pattern of surface sand in barchan dunes under the impact of sandstorms.

Key words: sandstorm; barchan dune; particle size; Taklimakan Desert